

## 同轴送粉激光定向能量沉积 IN718 的数值模拟

王予, 黄延禄\*, 杨永强

华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640

**摘要** 针对同轴送粉的激光定向能量沉积(DED), 结合送粉方程与 VOF (Volume of Fluid) 方法, 提出了沉积层计算模型, 采用固定坐标系下的移动边界条件, 对单道 IN718 成形过程进行了实时模拟, 并进行了实验验证。结果表明: 在单层单道沉积加工下, 随着扫描速度从  $8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到  $14 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 沉积层高度和宽度分别减小了 57.1% 和 21.6%, 计算所得沉积层高度、宽度及熔深与实验结果吻合良好。在此基础上, 计算了在单向平行搭接方式下搭接率为 30% 的单层双道沉积层温度场分布, 得到了不同搭接时刻沉积层的温度变化规律。受第一沉积层热累积的影响, 熔池潜热效应会使搭接加工时的表面最高温度略低于单道加工时的表面最高温度; 同时受搭接沉积层在扫描过程中高温状态的影响, 第一沉积层在搭接扫描过程中会出现回温现象, 回温区间为  $1000 \sim 1600 \text{ K}$ , 幅度为  $100 \sim 300 \text{ K}$ 。该研究成果对深入理解同轴送粉激光定向能量沉积工艺机理以及工艺优化具有重要意义。

**关键词** 激光技术; 同轴送粉; 数值模拟; 沉积层形状; 温度场

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0602115

### 1 引言

同轴送粉式金属激光 3D 打印技术是金属激光增材制造技术中的一种, 因其具有成形尺寸大、效率高、可利用材料范围广、成形件性能优异等优点, 在航空航天、装备制造及生物医药等领域有着广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。在同轴送粉激光的定向能量沉积(DED)过程中, 熔池内的传质、传热以及流动与成形件表面质量的好坏密切相关<sup>[4-6]</sup>, 数值模拟技术可以为研究这一系列相互耦合的复杂物理现象提供一种有效手段。张冬云等<sup>[7]</sup>采用三维瞬态模型模拟了采用同轴送粉激光金属沉积成形技术制作直壁墙的过程中熔池的温度场, 再现了成形过程中熔池形貌的变化及成形过程的不稳定性。任仲贺等<sup>[8]</sup>针对单道激光熔覆, 利用 ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 建立了单道激光熔覆的热传导模型, 在温度场的基础上得到单道激光熔覆的应力场并进行了实验验证。Caiazza 等<sup>[9]</sup>以铝合金材料单道和搭接激光沉积成形实验之后的沉积层形状为参考, 建立

了一个非稳态数学模型, 模拟了单道和搭接激光沉积时的温度场。陈文志等<sup>[10]</sup>通过有限元计算分析了在不同停顿时间下多道激光熔覆镍基合金表面的温度场并进行了实验验证, 结果表明, 道次间停顿 1.5 s 时, 熔覆的平整度较好, 熔覆质量较高。总体来说, 近年来研究人员针对送粉式激光沉积的数值建模取得较大进展, 但对于数值计算中沉积层形貌的计算大多进行了预先设定, 而事实上沉积层形貌的建立与发展是送粉、熔化及凝固等行为综合作用的结果。为对激光沉积层形状与尺寸进行精密控制并实现精密制造, 需要建立可以精确描述沉积层的形成、发展和熔池内物理过程的耦合数学模型并进行同步计算, 这对深入理解激光沉积制造的内在机理并提高成型件内在和表面质量具有重要意义。

本文建立了同轴送粉激光定向能量沉积制造过程的数学模型, 在 Fluent 软件中借鉴 VOF (Volume of Fluid) 方法并结合送粉方程实现了沉积层成形的实时计算; 对单道沉积成形 IN718 合金的温度场、沉积层形状以及熔池形貌进行了计算分析与实验对

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-08-17; 录用日期: 2020-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(51705160)、广东省重大专项(2018B090905001)

\*E-mail: yanlu@scut.edu.cn

比;在此基础上完成了对搭接成形过程的数值计算,并对其中熔池温度场特征、成因及对沉积层固态相变的潜在影响进行了较深入的分析。

## 2 数值建模

### 2.1 几何与物理模型

同轴送粉激光定向能量沉积过程如图 1 所示,一体式的送粉激光头在基体上方以恒定的速度  $V_0$  向  $x$  轴正向移动,采用恒定功率为  $P$  的激光束将送出的 IN718 粉末和基体材料熔化,从而形成熔池,通过出入氩气对熔池进行保护。随着激光束的移动,熔池快速冷却并凝固,从而在基体材料表面形成沉积层。

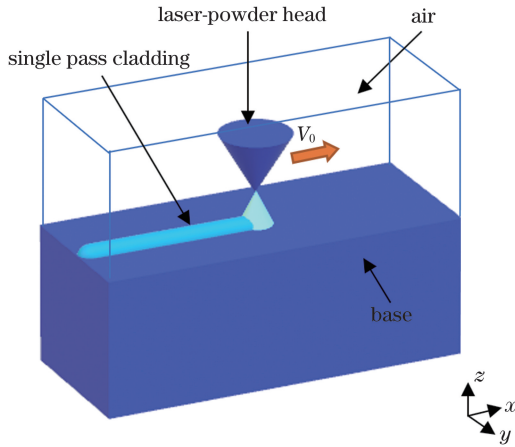


图 1 同轴送粉式增材制造示意图

Fig. 1 Schematic of coaxial powder feeding additive manufacturing

本文计算域如图 2 所示,其中上面区域代表空

气,下面区域代表 IN718 基材。初始光斑位置在计算区域中心即图中的  $(0.005 \text{ m}, 0.005 \text{ m}, 0.005 \text{ m})$  处。计算中模拟的空间采用结构化的立方体网格,单元尺寸为  $0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm} \times 0.1 \text{ mm}$ 。

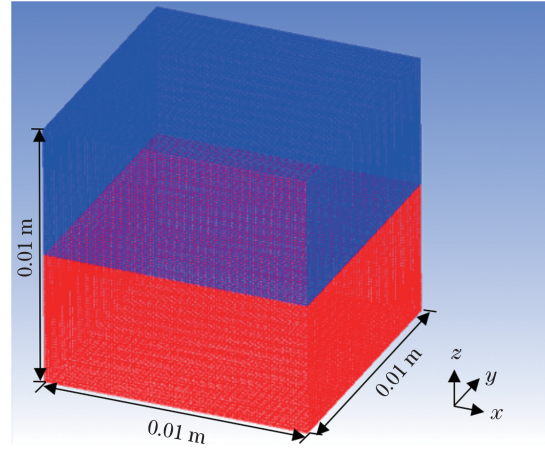


图 2 计算区域示意图

Fig. 2 Schematic of calculation domain

### 2.2 数学模型

#### 2.2.1 控制方程

激光定向能量沉积过程中,粉末与基体材料的熔化与凝固过程包含了熔池内质量、动量、能量的变化以及固液相变。其控制方程组包括连续性方程、动量方程以及能量方程,其表达形式如下。

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U}) = 0. \quad (1)$$

$x, y, z$  三个方向上的动量方程分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \text{div}(\rho \mathbf{U}u) = \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial u}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \text{div}(\rho \mathbf{U}v) = \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial v}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \text{div}(\rho \mathbf{U}w) = \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial w}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w. \quad (4)$$

能量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \text{div}(\rho \mathbf{U}h) = \text{div}(\frac{k}{c_p} \text{grad}h) + S_h, \quad (5)$$

其中

$$S_h = \frac{\partial}{\partial t}(\rho \Delta H) + \text{div}(\rho u_i \Delta H), \quad (6)$$

式中:  $\text{div}(\cdot)$  为散度;  $k$  为导热系数;  $c_p$  为等压比热;  $\text{grad}$  为梯度;  $S_h$  为能量方程源项;  $u_i$  为  $i$  方向上的运动速度;  $\rho$  为混合密度;  $t$  为时间;  $u, v$  和  $w$  分别

为混合速度矢量  $\mathbf{U}$  在  $x, y$  和  $z$  方向上的分量;  $p$  为压力;  $\mu$  为流体的动力黏度系数;  $S_u, S_v$  和  $S_w$  分别为  $x, y$  和  $z$  方向上动量方程的附加源项。沉积过程可以视为开口系等压过程,热量传输引起焓变,因此采用等压比热。在能量方程中,  $h$  为显焓;  $\Delta H$  为潜热,可以表示为

$$\Delta H = L f_1, \quad (7)$$

式中:  $f_1$  为液相质量分数;  $L$  为凝固潜热值。本文中将液相质量分数与温度按线性关系处理:

$$f_1 = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_1 - T_s}, & T_s \leq T \leq T_1 \\ 1, & T > T_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $T$  为单元温度值;  $T_s$  为固相线;  $T_1$  为液相线。

### 2.2.2 沉积层形状计算模型

本文借鉴 VOF 方法并结合送粉方程提出沉积层形状的计算模型, 其方程为

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{U}\varphi) = m_p, \quad (9)$$

式中:  $\varphi$  为计算单元内的 VOF 值;  $m_p$  为送粉流率 [ $\text{kg} \cdot (\text{s} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ ]。 (9) 式左边第一项表示单元 VOF 值随时间变化的非稳态项, 第二项为引起单元 VOF 值变化的对流项; (9) 式右端为送粉引起的附加源项。

粉末空间浓度分布在粉末汇聚空间内近似呈现高斯分布, 因此送粉流率  $m_p$  满足

$$m_p = 3v_p / \left[ (\pi r_p^2 \Delta z) \exp\left(\frac{-3d_p^2}{r_p^2}\right) \right], \quad (10)$$

式中:  $v_p$  为送粉速率 ( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $r_p$  为送粉半径 (m);  $d_p$  为当前单元到送粉激光头中心的距离 (m);  $\Delta z$  为单元高度 (m)。

### 2.2.3 移动高斯热源及其他边界条件

本文使用的光纤激光器在圆形光斑内的能量遵循高斯分布, 其热流密度  $Q(r)$  满足

$$Q(r) = 3P\eta / (\pi r_1^2) \exp\left(\frac{-3r^2}{r_1^2}\right), \quad (11)$$

式中:  $P$  为激光功率 (W);  $\eta$  为激光吸收率;  $r_1$  为激光的光斑半径 (m);  $r$  为当前单元到光斑中心轴的距离 (m)。本文暂不考虑激光束和粉末流在空间的交互作用, 即激光束对粉末颗粒的加热和粉末流对激光能量的消隐。在沉积层表面 (基体材料与空气交界面) 以及基体四周表面处还存在对流和辐射散热  $Q_1$ , 满足

$$Q_1 = h_c(T - T_r) + \epsilon\sigma(T^4 - T_r^4), \quad (12)$$

式中:  $T_r$  为环境温度;  $h_c$  为基体表面与空气的对流换热系数 [ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1})^{-1}$ ];  $\epsilon$  为基体表面的发射率;  $\sigma$  为斯蒂芬玻尔兹曼常数。因此, 添加给表面的热源项  $Q$  可以表示为

$$Q = Q(r) - Q_1. \quad (13)$$

熔池表面还存在由温度梯度引起的表面张力, 因此固液相交单元的动量边界条件为

$$\mu \frac{\partial v_{\text{vel}}}{\partial l_n} = -\frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial l_r}, \quad (14)$$

式中:  $v_{\text{vel}}$  为熔池表面切向速度;  $l_n$  为熔池表面处法

向距离;  $\gamma$  为表面张力;  $l_r$  为熔池表面处切向距离;  $\mu$  为动力黏度系数;  $\frac{\partial v_{\text{vel}}}{\partial l_n}$  为熔池表面法向速度梯度;

$\frac{\partial \gamma}{\partial T}$  为表面张力温度系数;  $\frac{\partial T}{\partial l_r}$  为熔池表面切向温度梯度。 (14) 式等号左端为切向应力, 右端为表面张力梯度。计算采用的参数如表 1 所示, IN718 合金的结晶潜热值取  $2.5 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 液相线温度和固相线温度分别为 1609 K 和 1533 K, 其他参数详见文献 [11]。

表 1 模拟选取参数

Table 1 Data used in simulation

Parameter	Value
Powder feeding radius $r_p$ /m	$1.5 \times 10^{-3}$
Time step $\Delta t$ /s	$1 \times 10^{-5}$
Laser absorptivity $\eta$ /%	70
Laser spot radius $r_1$ /m	$0.55 \times 10^{-3}$
Convective heat transfer coefficient $h_c$ / [ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1})^{-1}$ ]	350
Ambient temperature $T_r$ /K	300
Surface emissivity of substrate $\epsilon$	0.4

## 3 实验方法

同轴送粉式激光沉积设备如图 3 所示, 采用 1000 W 的光纤激光器, 在 IN718 基材上用 IN718 粉末进行沉积制造, 基板在使用前经过砂纸打磨去除氧化层。通过控制激光功率、送粉速率以及扫描速度来进行不同参数的单道加工, 成形后沿垂直于扫描方向切取金属试样, 研磨抛光之后进行镶样, 并用硝基盐酸腐蚀 45~60 s; 最后采用超景深显微镜 (Keyence VHX-5000) 观察试样并取沉积层稳定段的三个位置分别测量三次, 以最终得到的平均值表征单道沉积层和激光熔池的形貌尺寸。

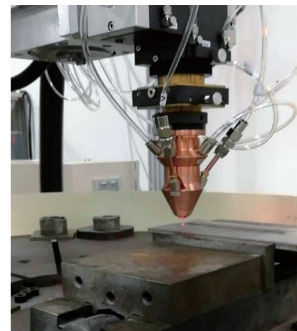


图 3 同轴送粉式激光沉积实验设备

Fig. 3 Experimental equipment of coaxial powder feeding laser deposition



## 4 结果分析与讨论

### 4.1 单道沉积层形状

采用激光功率为 500 W, 送粉速率为  $0.2 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ , 扫描速度分别为  $8, 10, 12, 14 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  进行单层单道沉积成形实验。图 4 展示了在一段时间之后沉积层形状达到稳态时的模拟结果, 可以明显看出当激

光功率和送粉速率一定时, 沉积层高度和宽度都会随着扫描速度的增加而降低。其他工艺参数固定, 当扫描速度从  $8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到  $14 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  即增大 75% 时, 沉积层高度和宽度分别减小了 57.1% 和 21.6%。可以看到扫描速度的变化对沉积层高度、宽度均存在一定的影响且其对沉积层高度的影响比对沉积层宽度的影响略大。

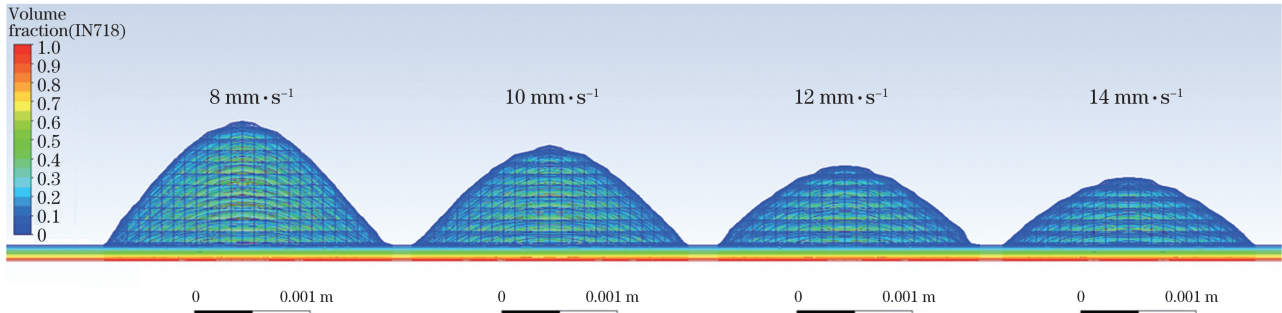


图 4 不同扫描速度下粉末沉积层形状模拟结果

Fig. 4 Simulation results of shape of deposition layer at different scanning speeds

对上述单道成形实验的试样在超景深显微镜下进行测量, 得到不同扫描速度时的沉积层形貌及尺

寸如图 5 所示。图 6 为模拟结果与实验测量结果的对比, 可以看出计算得到的不同扫描速度对应的沉

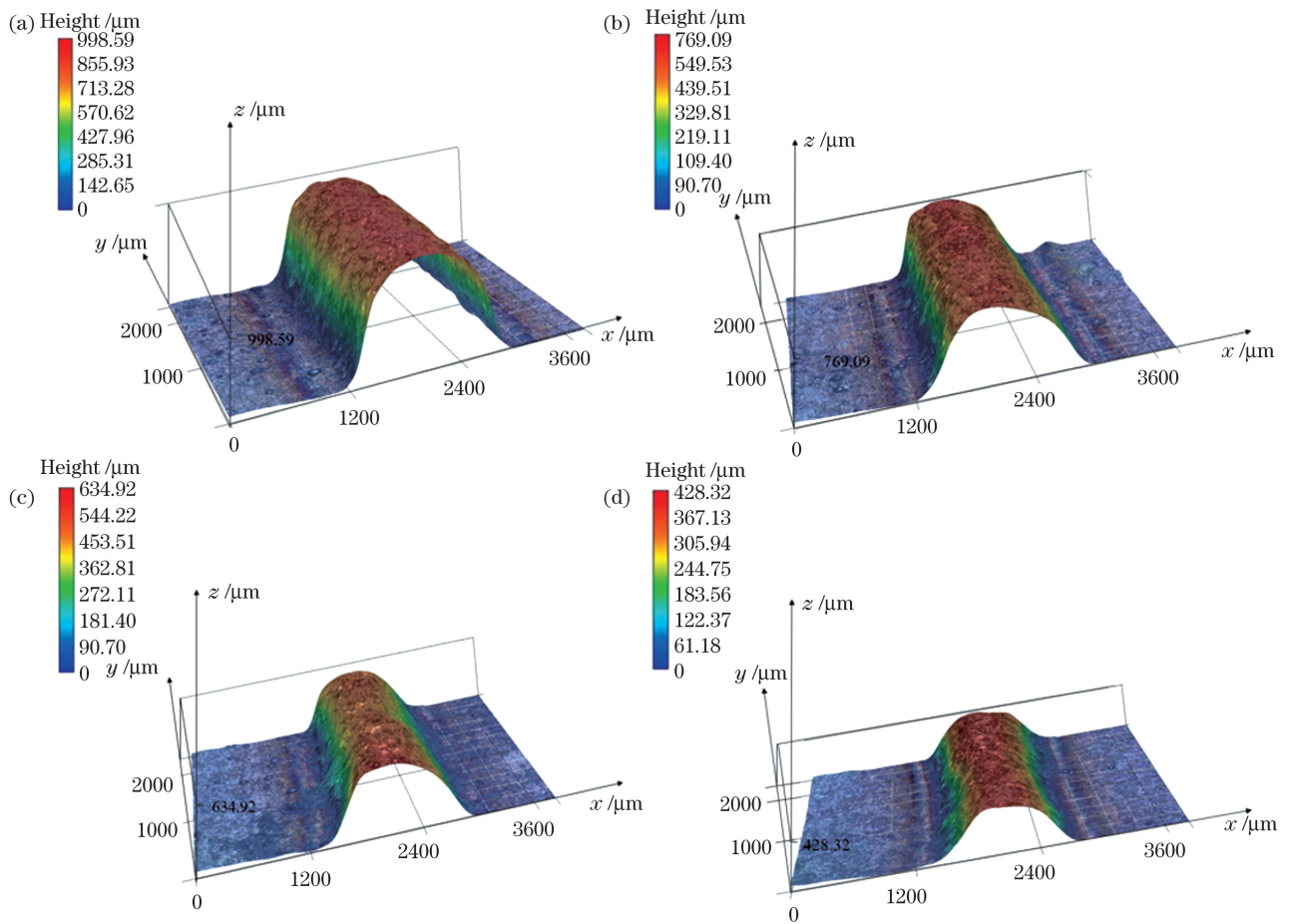


图 5 不同扫描速度下测量得到的沉积道形貌。(a)  $8 \text{ mm/s}$ ; (b)  $10 \text{ mm/s}$ ; (c)  $12 \text{ mm/s}$ ; (d)  $14 \text{ mm/s}$

Fig. 5 Measured deposition morphologies at different scanning speeds. (a)  $8 \text{ mm/s}$ ; (b)  $10 \text{ mm/s}$ ; (c)  $12 \text{ mm/s}$ ; (d)  $14 \text{ mm/s}$



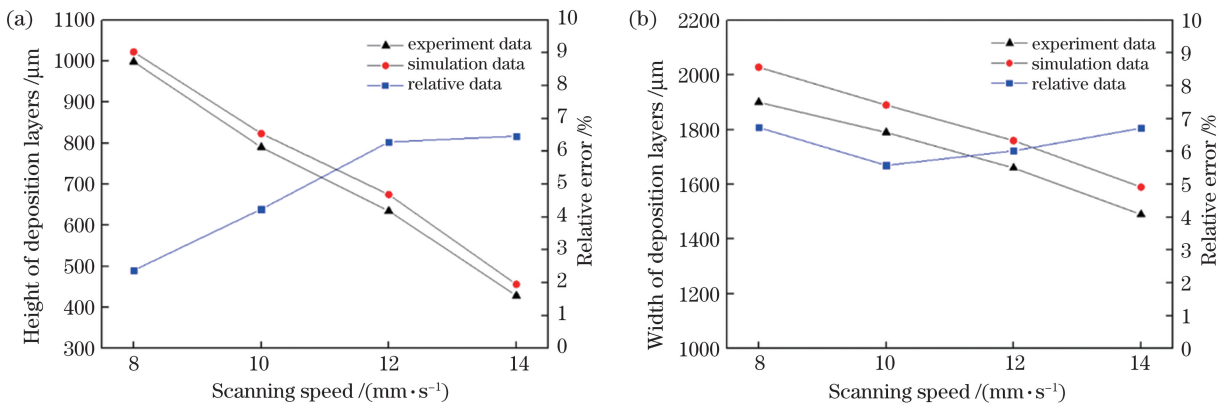


图 6 不同扫描速度下的沉积层尺寸。(a) 沉积层高度随扫描速度的变化;(b) 沉积层宽度随扫描速度的变化

Fig. 6 Size of deposition layer at different scanning speeds. (a) Height of deposition layer varies with scanning speed; (b) width of deposition layer varies with scanning speed

沉积层宽度和高度均大于实际测量结果,这表明沉积层形状模拟结果存在一定的系统误差。这主要是由所采用的基于正态分布的送粉方程与实验中粉末流浓度分布存在一定偏差所导致。经计算,高度的相对误差随扫描速度的增大从 2.32% 增加到 6.03%,而宽度的相对误差最高不超过 7%。沉积层高度值、宽度值的数值模拟结果与实验结果基本一致,这证明了本文所建立的数值模型的可靠性。

#### 4.2 单道沉积的温度场特征

对送粉速率为  $0.2 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 、激光功率为  $500 \text{ W}$ 、扫描速度为  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的工艺过程进行模拟计算,得到了不同时刻单道 IN718 沉积层温度场分布,如图 7 所示。在加工开始后  $0.05 \text{ s}$  以内,沉积层形状尚未达到稳定,激光光斑的中心区域温度最高,偏离激光光斑中心的表面温度迅速降低,沉积层表面温度场分布近似呈轴对称。对比图 7(c) 和

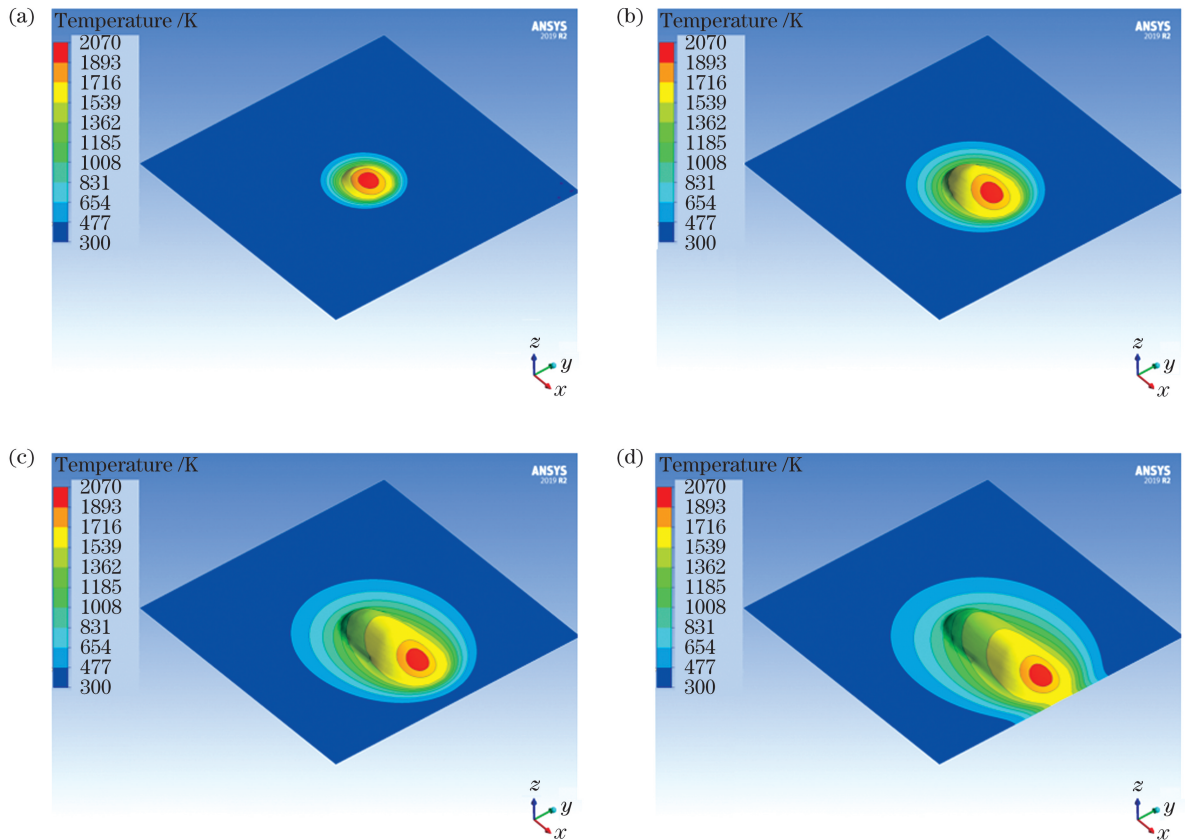


图 7 不同时刻单道沉积层表面温度场云图。(a) 0.05 s;(b) 0.15 s;(c) 0.30 s;(d) 0.40 s

Fig. 7 Temperature contours of single path deposition layer at different moments. (a) 0.05 s; (b) 0.15 s; (c) 0.30 s; (d) 0.40 s

图 7(d)可以看出,在加工开始 0.30 s 后,沉积层形状基本稳定,沉积层温度场分布的拖尾现象也越来越明显。

图 8 展示了与图 7 相对应时刻的三维熔池和沉积层形貌。整体上来看,随着加工过程的进行,沉积层高度不断增加,熔池的熔深、熔宽也在不断扩大,最终达到稳态。对比图 8(b)、(c)、(d)的沉积层形貌和熔池形状可以看出,相比于图 8(b),图 8(c)中

沉积层高度和熔池尺寸有所增大,而图 8(c)与图 8(d)中沉积层高度和熔池尺寸基本相同,已经达到稳态。经测量,本例中沉积层高度和熔池尺寸达到稳定的时间为 0.25 s,沉积层达到稳定之前的成形起始段长度为 2.50 mm。在特定工艺中,为了对激光沉积层形状与尺寸进行精密控制,需要对加工成形起始段进行处理,此时所取的长度最少是 2.50 mm。

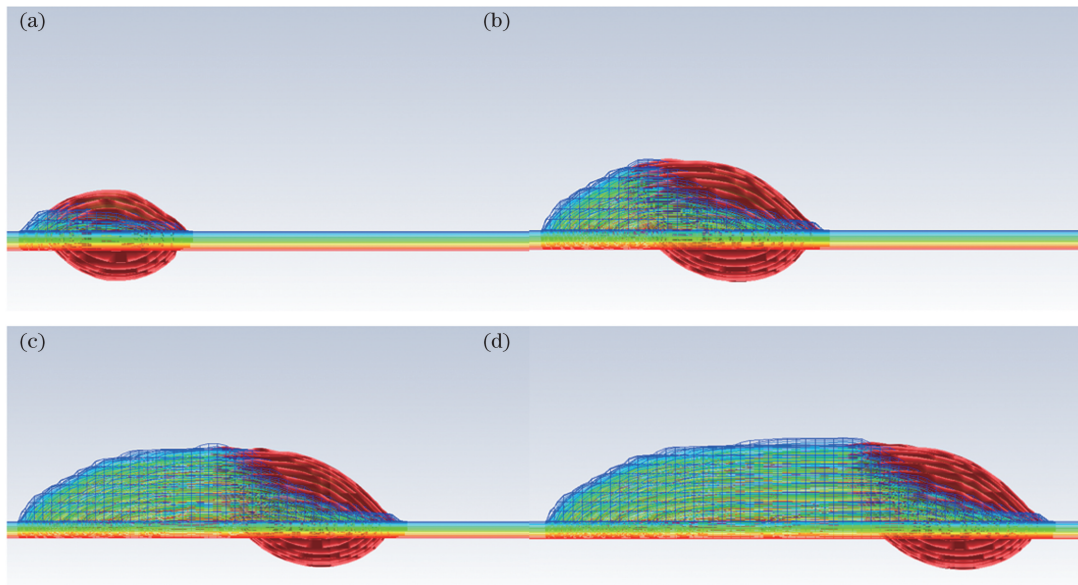


图 8 不同时刻单道成形三维熔池形貌图。(a) 0.05 s; (b) 0.15 s; (c) 0.30 s; (d) 0.40 s

Fig. 8 Three-dimensional molten pool morphologies of single path forming at different moments. (a) 0.05 s; (b) 0.15 s; (c) 0.30 s; (d) 0.40 s

选取实验所得沉积层形状稳定的中间段,通过超景深显微镜测量熔深,并与模拟结果进行对比,如图 9 所示。其中,计算所得熔深  $D_1$  和测量所得熔深  $D_2$  分别为  $279.89 \mu\text{m}$  和  $273.81 \mu\text{m}$ 。模拟结果与测量结果的相对误差为 2.22%,二者吻合良好。

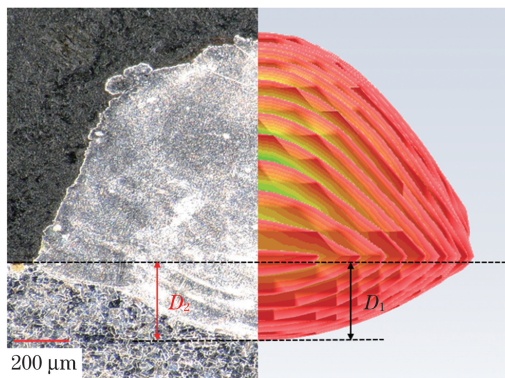


图 9 单道加工时实验与模拟所得熔池形貌对比

Fig. 9 Comparison of morphologies of molten pool for single path process obtained by experiment and simulation

相比于上文沉积层高度和宽度的相对误差,熔池熔深尺寸的相对误差较小,这说明由送粉方程所引起的系统误差对于沉积层形状尺寸的影响较大,而对于熔池熔深尺寸的影响相对较小。

#### 4.3 搭接沉积计算结果及分析

在上述送粉速率为  $0.2 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$ 、激光功率为 500 W、激光扫描速度为  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  的单道沉积计算的基础上,进行了搭接率为 30% 的单层双道沉积过程数值计算。采用单向平行搭接沉积方式,选取相同参数下搭接实验所得的沉积层形状稳定的中间段,通过超景深显微镜测量搭接后沉积层的宽度和熔深,并与模拟结果进行对比,对比结果如图 10 和图 11 所示。其中,计算和测量所得沉积层宽度  $W_1$  和  $W_2$  分别为  $3196.78 \mu\text{m}$  和  $2953.15 \mu\text{m}$ ,模拟结果与测量结果的相对误差为 8.24%;测量所得熔深  $D_3$  和计算所得熔深  $D_4$  分别为  $288.55 \mu\text{m}$  和  $303.63 \mu\text{m}$ ,模拟结果与测量结果的相对误差为 5.23%。通过与图 9 中单道加工时熔池形貌与尺寸的对比可知,搭接加工时的熔深略大,且熔池形状也不再对称。



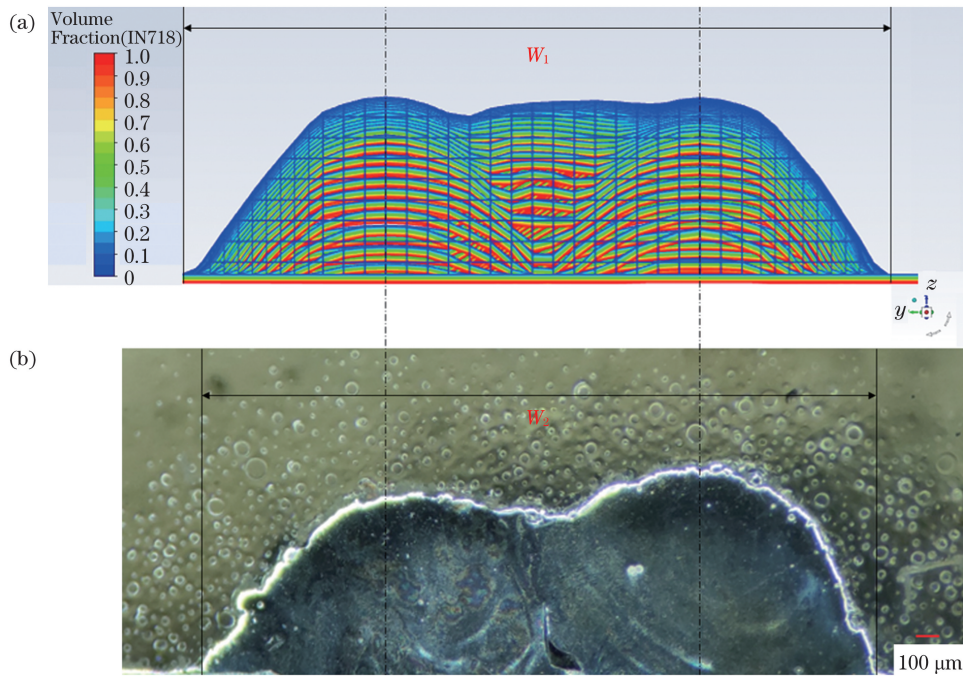


图 10 搭接加工时模拟与实验所得沉积层形貌对比。(a)模拟结果;(b)实验结果

Fig. 10 Comparison of deposition layer morphologies obtained by simulation and experiment. (a) Simulation result; (b) experimental result

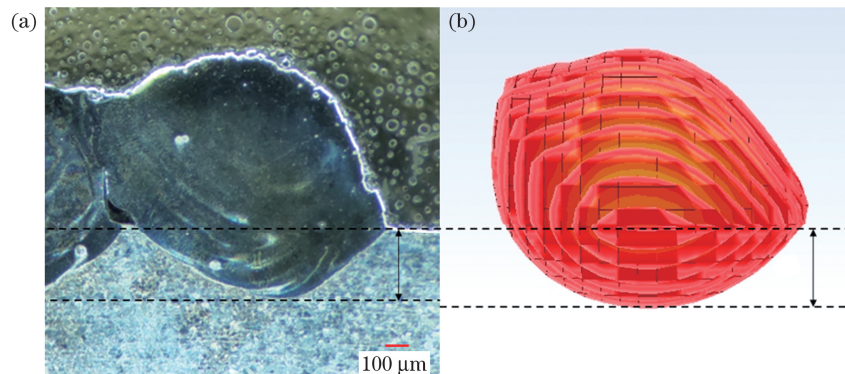


图 11 搭接加工时实验与模拟所得熔池形貌对比。(a)实验结果;(b)模拟结果

Fig. 11 Comparison of molten pool morphologies obtained by experiment and simulation. (a) Experimental result; (b) simulation result

在搭接过程中,第一沉积层与搭接沉积层的温度影响是相互的:第一沉积层的热积累对搭接道熔池和沉积层温度存在影响;同时,搭接沉积层的高温状态对第一沉积层的温度及冷却速度也存在影响,甚至可能会进一步影响到第一沉积层凝固之后的固态相变。图 12 为以搭接开始时刻为 0 时刻,扫描速度  $v_0 = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  时,不同时刻的沉积层温度场分布。从图 12 (a)~(d)可以看到:由于热累积的影响,搭接沉积层表面温度分布不再沿搭接道中轴线呈对称分布,而且同一温度范围在第一沉积层扫描

侧的分布明显变大;同时可以看到,在搭接沉积层表面中轴线左右两侧,等温线间距存在差异,在第一沉积层一侧的温度梯度比搭接沉积层一侧的温度梯度小,每一道沉积层两侧的冷却条件明显不同。

单道和搭接加工过程中,相同时刻的沉积层表面最高温度对比如图 13 所示,可以看出搭接加工时达到稳定的最高表面温度需要的时间较单道的略长,而且达到稳定之后的搭接加工时表面最高温度为 2038 K,较单道加工的最高表面温度 2068 K 略低。



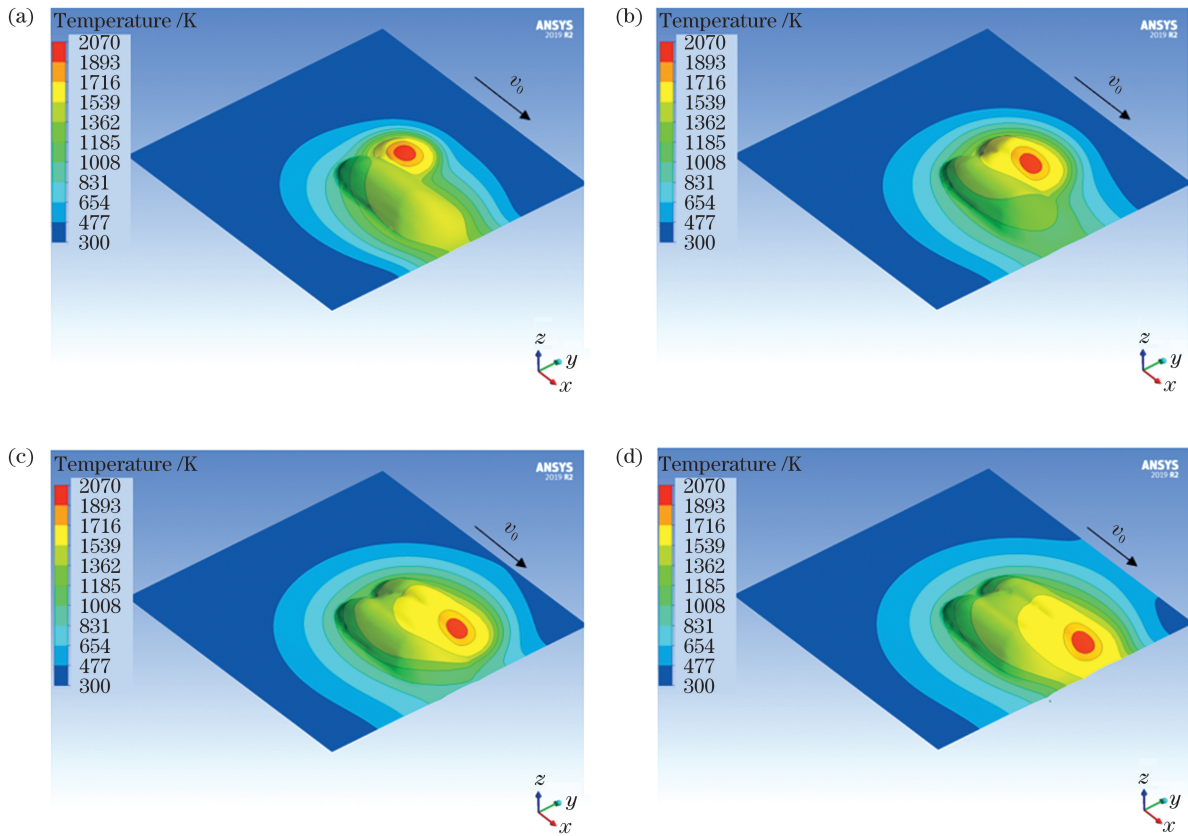


图 12 从搭接开始不同时刻的温度场分布。(a) 0.05 s; (b) 0.15 s; (c) 0.30 s; (d) 0.40 s

Fig. 12 Temperature distributions at different moments from beginning of overlapping. (a) 0.05 s; (b) 0.15 s; (c) 0.30 s; (d) 0.40 s

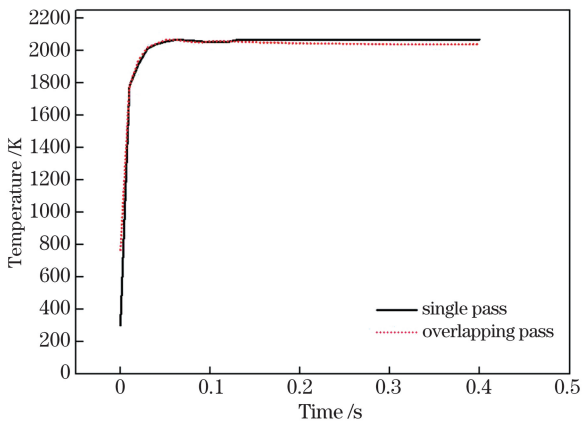


图 13 单道加工时与搭接加工时沉积层表面同一相对时刻的最高温度比较

Fig. 13 Comparison of highest temperatures of deposition layer surface for single path and overlapping processes at same relative moment

为了找到搭接加工较单道加工表面最高温度略低的原因,本文分析了图 9 和图 11 中单道和搭接加工时的熔池大小。分别提取单道和搭接加工时稳定熔池内熔化单元的个数,如图 14 所示,可以发现搭接熔化单元数较单道时增加了 114 个,即在搭接道

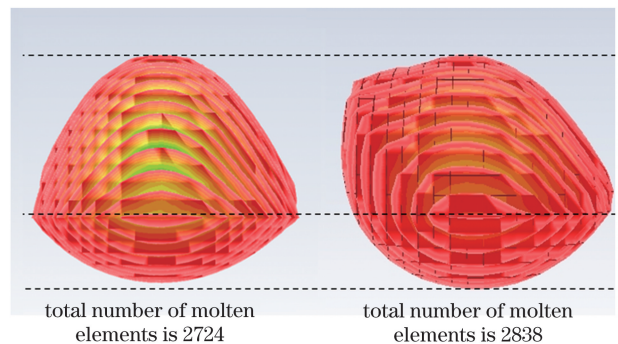


图 14 单道加工时与搭接加工时熔化单元个数比较

Fig. 14 Comparison of total numbers of molten elements in single path and overlapping processes

扫描时熔池增大了 4.19%。熔化单元会吸收熔化潜热,在同样能量输入的情况下,熔化单元个数越多,吸收的热量也就越多,所以造成了搭接道沉积层表面最高温度略低于单道沉积层表面最高温度。图 15 为单道加工时基底材料表面上距离激光扫描起始位置 0.003 m 的一点的温度随扫描时间变化的曲线,可以明显看到固相线温度曲线上的升温段斜率、液相线温度曲线上的降温段斜率发生了比较

明显的变化,这是由潜热的吸收和释放引起的。从图 15 还能看出,曲线的升温段的斜率改变比降温段更明显,这是由于激光照射到工件表面时金属材料发生了即时熔化,而激光移开之后金属材料的凝固存在滞后,这也正是熔池存在拖尾现象、熔池前沿比尾部温度梯度更大的原因所在。

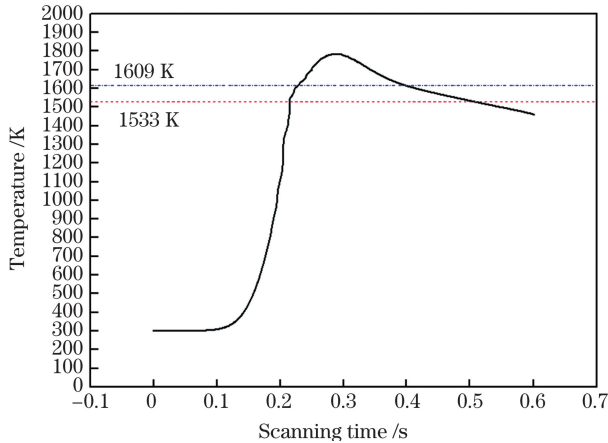


图 15 单道加工时基底材料表面一点(距离激光扫描起始位置 0.003 m)的温度随扫描时间的变化曲线

Fig. 15 Temperature varying with scanning time for a point (0.003 m away from starting position of laser scanning) on substrate surface during single path process

为了更清晰地描述并分析搭接道温度对第一沉积层温度的影响,以第二道搭接开始的时刻为零时刻,给出第一沉积层表面对称线上的温度变化情况,如图 16 所示。图中点划线所示位置是激光扫描的起始位置,即模型三维坐标系中扫描方向  $x$  坐标为 0.005 m 处。图中曲线可以根据  $x$  坐标位置分为几个特征区域:1)点划线左侧区域。在试样上这一部分未经激光扫描,所以温度曲线都是从试样边缘处略高于室温的温度开始,沿着向扫描起始点靠近的方向先缓慢上升而后快速上升,这说明在光斑附近试样上的温度梯度明显大于远离光斑处。2)图的最右侧,即  $x$  坐标 0.010 m 处。曲线自上而下主要是按时间顺序分布,只有最后两条曲线的时间顺序发生错位。这说明在光斑离开第一道进入搭接道后的大部分时间内,第一道末端都处于降温状态,只有在 0.31 s 后才发生了回温。3)点划线上。这个位置是两道扫描的起始位置。当光斑刚进入第二道(0.01 s)时,第一道已经过较长时间的冷却,温度相对较低。之后由于第二道能量输入的影响,从 0.01 s 到 0.16 s 第一道温度开始回升。0.21 s 开始此位置温度反而开始低于 0.16 s 对应的温度,并持续降

低,这是第二道扫描光斑已经远离该位置的结果。4)点划线右侧,以  $x$  坐标为 0.008 m 的位置为例进行分析。在搭接道扫描的 0.01 s 时刻,激光束刚刚进入搭接沉积层,此时该位置受第一道扫描影响较大,温度较高,达到了 1597.73 K。在此后的 0.06, 0.11, 0.16 s 时刻,由于搭接刚开始,搭接道上激光光斑位置与此位置的距离较远,此位置依旧处在降温状态,温度随着时间的推移一直下降到 1351.62 K。之后随着激光光斑距离此位置越来越远,在 0.21 s 温度升至 1436.13 K,开始出现回温现象。在 0.31 s 时温度达到最高 1535.88 K,此时的回温幅度为 184.26 K。通过对此区域的其他位置进行温度分析都得到类似结果。

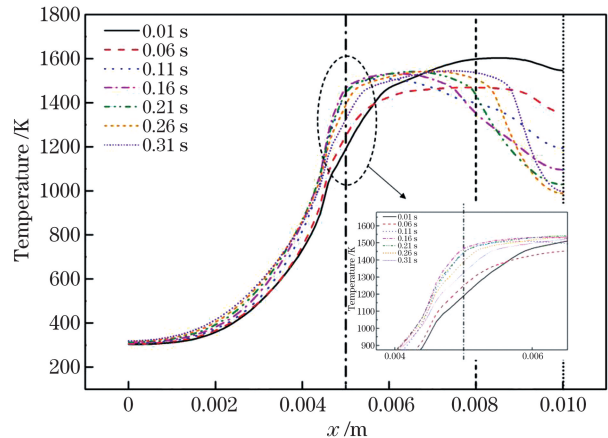


图 16 第一沉积层表面对称线上的温度变化

Fig. 16 Temperature change on symmetry line of first deposition layer surface

从图 16 可以看出,搭接道能量输入对第一道造成的回温现象从  $x$  为 0.005 m 的位置(第一道起始位置)开始就一直存在,这使得第一沉积层的温度整体上都经历了升高、降低、再升高、再降低的过程,且影响的温度区间在 1000~1600 K 之间,回温幅度为 100~300 K。在单向平行搭接沉积过程中,第一沉积层的回温改变了其在这个温度区间的停留时间、冷却速度和温度梯度。由于 IN718 合金的固态相变一般主要发生在 800~1500 K 之间<sup>[12]</sup>,这种回温现象会对第一沉积层的固态组织的形成产生影响。所以在搭接成形工艺中需要通过改变扫描路径等方式来实现延时搭接,从而避免冷却环境在某一道沉积层固态相变的温度区间内显著改变。

## 5 结 论

将送粉方程与 VOF 体积函数模型相结合,计算沉积层形貌,建立了三维同轴送粉激光定向能量

沉积过程的数学模型,实现了单道及搭接成形过程的模拟计算。当扫描速度从  $8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  增加到  $14 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,即增大 75%时,沉积层高度和宽度分别减小了 57.1%和 21.6%,计算所得的沉积层高度、宽度及熔深与实验结果吻合良好。在单向平行搭接扫描中,受第一沉积层热累积的影响,搭接加工得到的熔池较单道加工增大了 4.19%,吸收了更多的熔化潜热,搭接加工时的表面最高温度(2038 K)较单道加工时的表面最高温度(2068 K)略低。同时第一沉积层也受搭接沉积层在扫描过程中的高温状态影响,在不同位置存在不同程度的回温,其影响区间在 1000~1600 K,回温幅度为 100~300 K。对于 IN718 合金而言,这些现象会影响到第一沉积层凝固之后的固态相变。上述结果有助于理解沉积制造工艺机理,为激光沉积制造向高尺寸精度及高内在质量的发展提供参考。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang J P, Shi S H, Jiang W W, et al. Simulation analysis of temperature field and process optimization of laser cladding based on internal wire feeding of three beams[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1002004.  
张吉平, 石世宏, 蒋伟伟, 等. 三光束光内送丝激光熔覆温度场仿真分析与工艺优化[J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1002004.
- [2] Guo W, Zhang Y P, Chai R X. Numerical simulation and experimental study of single-track laser cladding of 304 stainless steels[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(9): 091401.  
郭卫, 张亚普, 柴蓉霞. 单道次激光熔覆 304 不锈钢数值模拟与实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(9): 091401.
- [3] Shi T, Wang Y Q, Lu B H, et al. Laser cladding forming of cantilevered thin-walled part based on hollow-laser beam inside powder feeding technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(10): 1003003.  
石拓, 王伊卿, 卢秉恒, 等. 中空激光内送粉熔覆成形悬垂薄壁件[J]. *中国激光*, 2015, 42(10): 1003003.
- [4] An X L, Lü Y Z, Qin Z X, et al. Progress in numerical simulation of laser 3D printing of metal by coaxial powder feeding: flow in welding pool, composition distribution and tissue growth [J]. *Materials Review*, 2018, 32(21): 3743-3753.  
安晓龙, 吕云卓, 覃作祥, 等. 同轴送粉金属激光 3D 打印熔池流动、成分分布以及组织生长数值模拟的研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(21): 3743-3753.
- [5] Xu L, Hong J, Wang W. Simulation analysis and experimental study on nanosecond laser cladding silicon nano film [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 0402008.  
徐龙, 洪捐, 汪炜. 纳秒激光熔覆硅纳米薄膜的仿真分析及实验研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(4): 0402008.
- [6] Acharya R, Bansal R, Gambone J J, et al. A coupled thermal, fluid flow, and solidification model for the processing of single-crystal alloy CMSX-4 through scanning laser epitaxy for turbine engine hot-section component repair (part I) [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2014, 45(6): 2247-2261.
- [7] Zhang D Y, Wu R, Zhang H F, et al. Numerical simulation of temperature field evolution in the process of laser metal deposition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0503006.  
张冬云, 吴瑞, 张晖峰, 等. 激光金属熔覆成形过程中温度场演化的三维数值模拟[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0503006.
- [8] Ren Z H, Wu M P, Tang Y H, et al. Numerical simulation and experimental research of laser cladding based on thermo-mechanical coupling [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(5): 051404.  
任仲贺, 武美萍, 唐又红, 等. 基于热力耦合的激光熔覆数值模拟与实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(5): 051404.
- [9] Caiazza F, Alfieri V. Simulation of laser-assisted directed energy deposition of aluminum powder: prediction of geometry and temperature evolution[J]. *Materials*, 2019, 12(13): 2100.
- [10] Chen W Z, Zhou H, Xu L J. Effect of pause time on temperature field of multi-channel cladding nickel-based alloy[J]. *Optical Technique*, 2020, 46(1): 96-101.  
陈文志, 周红, 徐立君. 停顿时间对多道熔覆镍基合金温度场的影响[J]. *光学技术*, 2020, 46(1): 96-101.
- [11] Romano J, Ladani L, Sadowski M. Laser additive melting and solidification of inconel 718: finite element simulation and experiment[J]. *JOM*, 2016, 68(3): 967-977.
- [12] Wu C W, Dong J X, Zhang M C, et al. Thermodynamic calculation and precipitation behavior of  $\alpha$ -Cr phase in IN718 alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(11): 1174-1178.  
吴翠微, 董建新, 张麦仓, 等.  $\alpha$ -Cr 相在 IN718 合金中的析出及其热力学计算[J]. *金属学报*, 2001, 37(11): 1174-1178.



# Numerical Simulation on Coaxial Powder Feeding Laser Directional Energy Deposition of IN718

Wang Yu, Huang Yanlu<sup>1\*</sup>, Yang Yongqiang

*School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China*

## Abstract

**Objective** During the coaxial powder feeding laser deposition process, the mass transfer, heat transfer, and fluid flow in the molten pool are closely related to the surface and internal quality of the formed part. Numerical simulation technology can provide an effective means for studying this series of coupled complex physical phenomena. In recent years, numerical modeling of powder feeding laser deposition has made great progress. However, the deposition layer morphologies in such model are mostly pre-set rather than being computed. In fact, the establishment and development of the deposition layer morphology is a combined result of powder feeding, melting, and solidification. During the development of the technology towards precision manufacturing, it is of great significance for understanding the deposition mechanism and improving the internal and surface quality of the parts to build a coupled mathematical model that can accurately describe the deposition formation and the physical processes in the molten pool. In this paper, a mathematical model of the coaxial powder feeding laser deposition is established, and the numerical computation of the single pass and overlap forming processes is completed. The shape of the deposition layer, the characteristics, and the cause of the temperature field of the molten pool are analyzed. We hope that this research can provide help for understanding the deposition mechanism dominating the forming process, which promotes laser deposition manufacturing towards high dimensional accuracy and high internal quality.

**Methods** In this study, a three-dimensional mathematical model of the coaxial powder feeding laser deposition is established by combining the volume of fluid (VOF) method with the powder feeding equation. The shape of the deposition layer and the morphology of the molten pool of single pass and overlap forming processes for IN718 alloy are simulated and verified by experiments with the same parameters. Based on the good agreement between the simulation results and the experimental results, the mutual influence of the temperature between the first pass deposition and the overlap pass deposition for the overlap forming is evaluated. The heat accumulation effect due to the first pass deposition on the temperature of the overlap and its molten pool is analyzed by comparing their maximum temperatures. At the same time, the effect of the current high temperature of the overlap pass deposition on the temperature gradient and cooling rate of the first pass deposition is analyzed by comparing temperature re-rising. The potential effect of the first pass deposition on the solid phase transition is also pointed out.

**Results and Discussions** The shape and size of the deposition layer of single pass forming are achieved by using the three-dimensional mathematical model presented in this paper, which are further compared with the experimental results (Fig. 4 and Fig. 5); the temperature field and the development of the three-dimensional molten pool morphology under different moments are obtained (Fig. 7 and Fig. 8); the molten pool depth calculated by the simulation is basically consistent with the experimental results (Fig. 9). On the basis of single pass forming simulation, the deposition layer shape, molten pool morphology, and temperature field are obtained for overlap forming process with 30% overlapping rate (Fig. 10, Fig. 11 and Fig. 12). Because of the thermal accumulation of the first pass deposition, the molten pool of the overlap pass deposition is 4.19% larger than that of single pass process and absorbs more latent heat of fusion, which leads to that the maximum surface temperature of the overlap pass deposition is slightly lower than that of the single pass forming (Fig. 13 and Fig. 14). At the same time, affected by the high temperature state of the overlap pass deposition, the temperature of the first pass deposition re-rises in the range of 1000–1600 K, and the amplitude is 100–300 K (Fig. 16).

**Conclusions** In this paper, a three-dimensional mathematical model is put forward by combining the VOF method with the powder feeding equation, and the simulations of single pass and overlap laser deposition forming processes with coaxial powder feeding are realized. When the scanning speed is increased by 75%, that is, from 8 mm/s to 14 mm/s, the height and width of the deposition layer are reduced by 57.1% and 21.6%, respectively. The

calculated height, width, and depth of the single pass deposition are in good agreement with the experimental results. In the overlap forming process with 30% overlapping rate for one-way parallel scanning, influenced by the heat accumulation of the first pass deposition, the molten pool formed by the overlap pass deposition is 4.19% larger than that formed by the single pass forming, and more latent heat of fusion is absorbed, which causes that the highest surface temperature of 2038 K during the overlap forming is slightly lower than that of 2068 K during single pass forming. At the same time, the first pass deposition is also affected by the high temperature state of the overlap, which presents the temperature re-rise to some extent at different positions. Because the temperature re-rise occurs within 1000–1600 K with an amplitude of 100–300 K, the solid phase transition of the first pass deposition will be affected for IN718 alloy. The results of this study are of great significance for process optimization and quality improvement in laser deposition technology.

**Key words** laser technique; coaxial powder feeding; numerical simulation; deposition layer shape; temperature field

**OCIS codes** 140.3390; 140.6810; 140.3380